Analogía entre las Leyes de Transporte

- El transporte molecular de energía o conductividad térmica (k), se define a partir de la Ley de Fourier y su tratamiento matemático es análogo a la transferencia molecular del momentum o la Ley de Newton para los fluidos viscosos, donde la constante resultante es la viscosidad (μ) y de la transferencia de masa o primera Ley de Fick, donde la constante resultante es el coeficiente de difusión (D).

Ley de Newton para los fluidos viscosos

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy}$$

Ley de Fourier

$$\frac{q_y}{A} = -k \frac{dT}{dy}$$

Ley de Fick

$$J_i = -D \frac{dC}{dy}$$

Analogías entre las Leyes de Transporte

- Las ecuaciones generales de las Leyes de Transporte de momentum y energía, adicional a la Ley de Hooke, las podemos resumir:

$$\underline{\underline{\Pi}} = P\,\underline{\underline{\delta}} + \underline{\underline{\tau}} = -\,\underline{\underline{\underline{\underline{\mu}}}}\,\underline{\nabla v}$$

$$\Pi_{ij} = P\delta_{ij} + \tau_{ij} = -\,\mu_{ijkl}\,\frac{\partial v_k}{\partial \mathbb{X}_l}$$

Ley de Newton para Fluidos Viscosos

$$\underline{\underline{\sigma}} = -\,\underline{\underline{\underline{\underline{E}}}}\,\underline{\underline{\varepsilon}}$$

$$\sigma_{ij} = -\,E_{ijkl}\varepsilon_{kl}$$

Ley de Hooke para Sólidos Elásticos

$$\frac{q_T}{A} = -\,\underline{\underline{k}}\,\underline{\nabla T}$$

$$\frac{q_j}{A} = -\,k_{ij}\,\frac{\partial T}{\partial \mathbb{X}_i}$$

Ley de Fourier para la Conducción de Calor

Escalar o Tensor de orden cero

Vector o Tensor de primer orden

Tensor simétrico de segundo orden

Tensor de cuarto orden

Analogías entre las Leyes de Transporte

- Pero podemos expresar las Leyes de Transporte de momentum y energía en términos de la concentración de la propiedad conservativa de transporte:

$$\underline{\underline{\tau}} = -\frac{\rho}{\rho}\,\underline{\underline{\underline{\underline{\mu}}}}\,\underline{\nabla v} = -\underline{\underline{\underline{\underline{\nu}}}}\,\underline{\nabla\left(\rho v\right)}$$

$$\frac{\underline{q_T}}{\underline{A}} = -\frac{\rho\ Cp}{\rho\ Cp}\,\underline{\underline{k}}\,\underline{\nabla T} = -\underline{\underline{\alpha}}\,\underline{\nabla(E_H)}$$

$$\tau_{ij} = -\,\nu_{ijkl}\,\frac{\partial(\rho v_k)}{\partial \mathbb{X}_l}$$

Ley de Newton para Fluidos Viscosos

$$\frac{q_j}{A} = -\,\alpha_{ij}\,\frac{\partial E_H}{\partial \mathbb{X}_i}$$

Ley de Fourier para la Conducción de Calor

Escalar o Tensor de orden cero

Vector o Tensor de primer orden

Tensor simétrico de segundo orden

Tensor de cuarto orden

Analogías entre las Leyes de Transporte

- Analizando cada ecuación tenemos:

Ley de Newton para Fluidos Viscosos

$$\tau_{ij} = -\nu_{ijkl}\frac{\partial(\rho v_k)}{\partial \mathbb{X}_l}$$

Viscosidad Cinemática

$$\nu_{ijkl} = \frac{\mu_{ijkl}}{\rho} = \frac{[longitud]^2}{[tiempo]}$$

Ley de Fourier para la Conducción de Calor

$$\frac{q_j}{A} = -\alpha_{ij}\frac{\partial E_H}{\partial \mathbb{X}_i}$$

Coeficiente de Difusión Térmica

$$\alpha_{ij} = \frac{k_{ij}}{\rho\, Cp} = \frac{[longitud]^2}{[tiempo]}$$

$$\rho\, v_k = \frac{[masa]}{[longitud]^3}\frac{[longitud]}{[tiempo]} = \frac{[momentum]}{[longitud]^3}$$

Concentración de Propiedad Conservativa
Magnitud de Propiedad por unidad de volumen

$$\rho\, Cp\, T = E_H = \frac{[masa]}{[longitud]^3}\frac{[energía]}{[temperatura][masa]}[temperatura] = \frac{[energía]}{[longitud]^3}$$

Ejemplos de Leyes Basadas en el Gradiente de Propiedades Conservativas (Analogías)

Name	Process	Flux	Gradient
1. Fick's law	Diffusion	$N/A = -D\frac{dC}{dx}$	Concentration
2. Fourier's law	Conduction	$q/A = -k\frac{dT}{dx}$	Temperature
3. Alternative formulation		$q/A = -\alpha\frac{d(\rho CpT)}{dx}$	Energy concentration
4. Newton's viscosity law	Molecular momentum transport	$F_x/A = \tau_{qx} = -\mu\frac{dv_x}{dy}$	Velocity
5. Alternative formulation		$F_x/A = \tau_{yx} - \nu\frac{d(\rho v_x)}{dy}$	Momentum concentration
6. Poiseuille's law	Viscous flow in a circular pipe	$v_x = -\frac{d^2}{32\mu}\frac{dp}{dx}$	Pressure
7. D'Arcy's law	Viscous flow in a porous medium	$v_x = -\frac{K}{\mu}\frac{dp}{dx}$	Pressure

- N = flujo molar [mol]/[tiempo].
- A = área de transferencia [longitud]^2.
- **(N/A) = flux másico molar [mol]/[longitud]^2/[tiempo].**
- **D = coeficiente de difusión másico [longitud]^2/[tiempo].**
- **C = concentración molar [mol]/ [longitud]^3.**
- x, y = distancia [longitud].
- q = flujo de calor [energía]/[tiempo].
- **(q/A) = flux de calor [energía]/[longitud]^2/[tiempo].**
- k = conductividad térmica [energía]/[tiempo]/[long.]/[temp.].
- T = temperatura [temperatura absoluta]
- **α = coeficiente de difusión térmico [longitud]^2/[tiempo].**
- ρ = densidad del fluido o sólido [mol]/ [longitud]^3.
- Cp = capacidad calorífica [energía]/[mol]/[temperatura].
- **(ρ Cp T) = concentración de calor [energía]/ [longitud]^3.**
- F = fuerza [masa] [longitud]/[tiempo]^2.
- **τ = esfuerzo cortante (flux) [fuerza]/[long.]^2=[momentum]/[tiempo] [long.]^2.**
- v = velocidad [longitud]/[tiempo]
- μ = viscosidad [masa]/[longitud]/[tiempo].
- **ν = viscosidad cinemática [longitud]^2/[tiempo].**
- **(ρ ν) = concentración de momentum [momentum]/ [longitud]^3**

Mass Transfer. Principles and Applications. Diran Basmadjian. CRC Press, Taylor & Francis e-Library, 2005.

Analogías entre Procesos de Transferencia de Calor y de Masa.

	Heat-transfer quantities (pure fluids)	Binary mass-transfer quantities (isothermal fluids, molar units)	Binary mass-transfer quantities (isothermal fluids, mass units)
Dimensionless groups common to all three correlations	$\mathrm{Re} = l_0 v_0 \rho/\mu$ $\mathrm{Fr} = v_0^2/g l_0$	$\mathrm{Re} = l_0 v_0 \rho/\mu$ $\mathrm{Fr} = v_0^2/g l_0$	$\mathrm{Re} = l_0 v_0 \rho/\mu$ $\mathrm{Fr} = v_0^2/g l_0$
Dimensionless groups that are different	$\mathrm{Nu} = h l_0/k$ $\mathrm{Pr} = \hat{C}_p \mu/k$ $\mathrm{Gr} = l_0^3 \overline{\rho}^2 g \beta \Delta T/\mu^2$ $\mathrm{Pé} = \mathrm{Re\,Pr} = \rho l_0 v_0 \hat{C}_p/k$	$\mathrm{Sh} = k_x l_0/c\mathscr{D}_{AB}$ $\mathrm{Sc} = \mu/\rho\mathscr{D}_{AB}$ $\mathrm{Gr}_x = l_0^3 \overline{\rho}^2 g \xi \Delta x_A/\mu^2$ $\mathrm{Pé} = \mathrm{ReSc} = l_0 v_0/\mathscr{D}_{AB}$	$\mathrm{Sh} = k_\omega l_0/\rho\mathscr{D}_{AB}$ $\mathrm{Sc} = \mu/\rho\mathscr{D}_{AB}$ $\mathrm{Gr}_\omega = l_0^3 \overline{\rho}^2 g \zeta \Delta \omega_A/\mu^2$ $\mathrm{Pé} = \mathrm{ReSc} = l_0 v_0/\mathscr{D}_{AB}$
Chilton-Colburn j-factors	$j_H = \mathrm{NuRe^{-1}Pr^{-1/3}} = \dfrac{h}{\rho \hat{C}_p v_0}\left(\dfrac{\hat{C}_p \mu}{k}\right)^{2/3}$	$j_D = \mathrm{ShRe^{-1}Sc^{-1/3}} = \dfrac{k_x}{c v_0}\left(\dfrac{\mu}{\rho\mathscr{D}_{AB}}\right)^{2/3}$	$j_D = \mathrm{ShRe^{-1}Sc^{-1/3}} = \dfrac{k_\omega}{\rho v_0}\left(\dfrac{\mu}{\rho\mathscr{D}_{AB}}\right)^{2/3}$

Note: (a) the subscript 0 on l_0 and v_0 indicates the characteristic length and velocity respectively, whereas the subscript 0 on the mole (or mass) fraction and molar (or mass) flux means "evaluated at the interface." (b) All three of these Grashof numbers can be written as $\mathrm{Gr} = l_0^3 \rho g\, \Delta\rho/\mu^2$, provided that the density change is caused only by a difference of temperature or composition.

Número de Reynolds

$$Re_f = \frac{l_c \, v_f \, \rho_f}{\mu_f}$$

Fuerzas inerciales debidas al movimiento de un fluido

Fuerzas viscosas (moleculares) que se oponen al movimiento de un fluido

- El número de Reynolds se asocia con la turbulencia de un fluido. Se habla de flujo en régimen laminar números de Reynolds bajos o flujo en régimen turbulento números de Reynolds altos, dependiendo del sistema y el fluido.
- Donde: Re_f es el número de Reynolds de la fase "f" [adimensional], l_c es la longitud característica que puede ser una distancia o un radio [longitud], v_f es la velocidad de un fluido correspondiente a la fase "f" [longitud]/[tiempo], ρ_f densidad de la fase "f" [masa]/[longitud]^3, μ_f es la viscosidad de la fase "f" [masa]/[(longitud*tiempo)]. Fases típicas líquido, gas, supercrítico.

Número de Froudé

$$Fr_f = \frac{v_f^{\,2}}{g\, l_c} = \frac{v_f}{\sqrt{g\, l_c}}$$

Fuerzas inerciales o de movimiento

Fuerza debida a la acción de la gravedad.

- Sus aplicaciones se han visto en análisis de conducción de calor, análisis dimensional, condensación en el interior de tubos, flujo con cambio de fase, transferencia de calor en la condensación. Debido a esto puede tomar otras formas características.
- Donde: Fr_f es el número de Froudé de la fase "f" [adimensional], l_c es la longitud característica que puede ser una distancia o un radio [longitud], v_f es la velocidad de un fluido correspondiente a la fase "f" [longitud]/[tiempo], g es la constante gravitacional [longitud]/[tiempo]^2.

Número de Prandtl

$$Pr = \frac{Cp\ \mu}{k}$$

Velocidad de difusión de la cantidad de momentum.

Velocidad de difusión de calor.

- Este número compara estas velocidades de difusión de los procesos de movimiento y calor. Su número análogo en la transferencia de masa es el número de Schmidt.

- Donde: Pr es el número de Prandtl [adimensional], μ es la viscosidad de la fase [masa]/[(longitud.tiempo)], Cp es la capacidad calorífica del medio [energía]/[(masa.temperatura)], k es la conductividad térmica del medio [energía]/[(tiempo.temperatura.longitud)].

Número de Nusselt

Transporte de calor por convección.

$$Nu = \frac{h\, l_c}{k} = \mathbb{C}\, Re^m Pr^n$$

Transporte de calor por conducción.

- Este número adimensional se puede obtener a partir de un análisis de transferencia de calor en un problema de capa límite, donde dependerá de otros dos números adimensionales. Compara las contribuciones de transmisión de calor debido a los procesos convectivos y de conducción. En masa su número análogo es el Sherwood.
- Donde: Nu es el número de Nusselt [adimensional], l_c es la longitud característica que puede ser una distancia o un radio [longitud], h es el coeficiente de transferencia de calor [energía]/[tiempo.temperatura.longitud^2)], k es la conductividad térmica del medio [energía]/[(tiempo.temperatura.longitud)], $\mathbb{C}$, m y n son constantes, Pr es el número de Prandtl y Re el número de Reynolds.

Número de Péclet

Tiempo de flujo.

$$Pe = \frac{l_c\, v_f\, \rho_f\, Cp}{k} = \frac{l_c\, v_f}{\alpha} = Re\, Pr$$

Tiempo de difusión térmica.

- Compara un tiempo característico relacionado con el flujo de una fase (tiempo de residencia) con el tiempo característico del proceso de difusión de calor.
- Donde: Pe es el número de Péclet [adimensional], l_c es la longitud característica que puede ser una distancia o un radio [longitud], v_f es la velocidad de un fluido correspondiente a la fase "f" [longitud]/[tiempo], ρ_f densidad de la fase "f" [masa]/[longitud]^3, α es el coeficiente de difusión térmica [longitud]^2,/[tiempo], k es la conductividad térmica del medio [energía]/[(tiempo.temperatura.longitud)], Pr es el número de Prandtl y Re el número de Reynolds.

Ejercicio. Valores Típicos del Coeficiente de Difusión Térmico

- Calcule el valor del coeficiente de difusión térmico α para los siguientes materiales:
- Aluminio a 300 K y 700 K.
- Carburo de silicio a 1000 K.
- Parafina a 300 K.

- Para ello emplee las siguientes constantes:

Material	Densidad $\frac{Kg}{m^3}$	Capacidad Calorífica $\frac{J}{Kg\ K}$	Conductividad Térmica $\frac{J}{s\ m\ K}$
Aluminio	2702 @ 300 K	903 @ 300 K 1090 @ 700 K	237 @ 300 K 225 @ 700 K
Carburo de silicio	3160 @ 300 K	1195 @ 1000 K	87 @ 1000 K
Parafina	900 @ 300 K	2890 @ 300 K	0.24 @ 300 K

Ejercicio. Valores Típicos del Coeficiente de Difusión Térmico

- Observe en la tabla el aluminio presenta el valor de k más alto (metal), mientras que la parafina presenta el más bajo (orgánico).
- La capacidad calorífica del aluminio cambia un 17 % por el cambio de temperatura establecido.
- Al emplear una densidad a 300 K, estamos ignorando el efecto de expansión térmica de los materiales, pero el valor de α a pesar de ello se obtiene una muy buena aproximación.

Material	Densidad $\frac{Kg}{m^3}$	Capacidad Calorífica $\frac{J}{Kg\,K}$	Conductividad Térmica $\frac{J}{s\,m\,K}$
Aluminio	2702 @ 300 K	903 @ 300 K 1090 @ 700 K	237 @ 300 K 225 @ 700 K
Carburo de silicio	3160 @ 300 K	1195 @ 1000 K	87 @ 1000 K
Parafina	900 @ 300 K	2890 @ 300 K	0.24 @ 300 K

Ejercicio. Valores Típicos del Coeficiente de Difusión Térmico

Material	Densidad $\frac{Kg}{m^3}$	Capacidad Calorífica $\frac{J}{Kg\,K}$	Conductividad Térmica $\frac{J}{s\,m\,K}$	Coeficiente de Difusión Térmica $\frac{m^2}{s}$
Aluminio	2702 @ 300 K	903 @ 300 K 1090 @ 700 K	237 @ 300 K 225 @ 700 K	$97.1 \cdot 10^{-6}$ $76.0 \cdot 10^{-6}$
Carburo de silicio	3160 @ 300 K	1195 @ 1000 K	87 @ 1000 K	$23.0 \cdot 10^{-6}$
Parafina	900 @ 300 K	2890 @ 300 K	0.24 @ 300 K	$9.2 \cdot 10^{-8}$

Ejercicio. Estimación de las Propiedades de Transporte de un Material Compuesto.

- La conductividad térmica de un nanofluido conteniendo una dispersión uniforme de nanopartículas esféricas aisladas puede aproximarse a la siguiente ecuación:

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{k_p + 2\,k_{bf} + 2\,\phi\,(k_p - k_{bf})}{k_p + 2\,k_{bf} - \phi\,(k_p - k_{bf})}$$

- Donde ϕ es la fracción volumen que ocupan las nanopartículas (adimensional), k_{bf}, k_p, k_{nf} son las conductividades térmicas del fluido base, de la nanopartícula y del nanofluido resultante, respectivamente (energía/tiempo/longitud/temperatura).

Ejercicio. Estimación de las Propiedades de Transporte de un Material Compuesto.

- A viscosidad dinámica es modelada por la ecuación de Einstein para la viscosidad:

$$\boldsymbol{\mu_{nf} = \mu_{bf}\,(1 + 2.5\,\phi)}$$

- Donde $\boldsymbol{\phi}$ es la fracción volumen que ocupan las nanopartículas (adimensional), $\boldsymbol{\mu_{bf}}$, $\boldsymbol{\mu_{\mathrm{n}f}}$ son las viscosidades del fluido base y del nanofluido resultante, respectivamente (masa/tiempo/longitud).
- Determine los valores de la conductividad térmica del nanofluido $\boldsymbol{k_{nf}}$, densidad del nanofluido $\boldsymbol{\rho_{nf}}$, capacidad calorífica del nanofluido $\boldsymbol{Cp_{nf}}$, viscosidad del nanofluido $\boldsymbol{\mu_{nf}}$, y el coeficiente de difusión $\boldsymbol{\alpha_{nf}}$ para un mezcla de agua con nanopartículas de óxido de aluminio Al_2O_3 a 300 K y considerando que las partículas ocupan un 5 % del volumen de la mezcla.

Ejercicio. Estimación de las Propiedades de Transporte de un Material Compuesto.

- Las propiedades de las fases agua y óxido de aluminio son las siguientes:

Material	Densidad $\frac{Kg}{m^3}$	Capacidad Calorífica $\frac{KJ}{Kg\,K}$	Conductividad Térmica $\frac{J}{s\,m\,K}$	Viscosidad $\frac{Kg}{m\,s}$
Agua	$\rho_{bf} = 997$	$Cp_{bf} = 4.179$	$k_{bf} = 0.613$	$\mu_{bf} = 855 \cdot 10^{-6}$
Al_2O_3	$\rho_p = 3970$	$Cp_p = 0.765$	$k_p = 36$	–

Ejercicio. Estimación de las Propiedades de Transporte de un Material Compuesto.

- Con los valores de las conductividades térmicas y el valor de la fracción de volumen ocupado por las partículas calculamos el valor de la conductividad térmica del nanofluido (la mezcla del agua con las nanopartículas de óxido de aluminio):

$$k_{nf} = 0.613 \frac{Watt}{m\,K} \frac{36 + 2\,(0.613) + 2\,(0.05)\,(36 - 0.613)}{36 + 2\,(0.613) - 0.05\,(36 - 0.613)}$$

$$\boxed{k_{nf} = 0.705 \frac{Watt}{m\,K}}$$

Ejercicio. Estimación de las Propiedades de Transporte de un Material Compuesto.

- Por el principio de conservación de masa podemos escribir que el producto de la densidad por el volumen de la mezcla es la masa del nanofluido:

$$\rho_{nf} V = \rho_{bf} V (1 - \phi) + \rho_p V (\phi)$$

- Despejando la densidad del nanofluido:

$$\rho_{nf} = \rho_{bf} (1 - \phi) + \rho_p (\phi)$$

$$\rho_{nf} = [997 (1 - 0.05) + 3970 (0.05)] \frac{Kg}{m^3}$$

$$\rho_{nf} = 1146 \frac{Kg}{m^3}$$

Ejercicio. Estimación de las Propiedades de Transporte de un Material Compuesto.

- La capacidad calorífica se calcula como una mezcla:

$$Cp_{nf} = \frac{\rho_{bf}\, Cp_{bf}(1-\phi) + \rho_p\, Cp_p\,(\phi)}{\rho_{nf}}$$

$$Cp_{nf} = \frac{997\frac{Kg}{m^3}\left(4.179\frac{KJ}{Kg\,K}\right)(1-0.05) + 3970\frac{Kg}{m^3}\left(0.765\frac{KJ}{Kg\,K}\right)(0.05)}{1146\,\frac{Kg}{m^3}}$$

$$\boxed{Cp_{nf} = 3.587\,\frac{KJ}{Kg\,K}}$$

Ejercicio. Estimación de las Propiedades de Transporte de un Material Compuesto.

- La viscosidad dinámica es modelada por la ecuación de Einstein para la viscosidad:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}\,(1 + 2.5\,\phi)$$

$$\mu_{nf} = 885 \cdot 10^{-6}\ \frac{Kg}{m\,s}\left(1 + 2.5\,(0.05)\right)$$

$$\boxed{\mu_{nf} = 962 \cdot 10^{-6}\,\frac{Kg}{m\,s}}$$

Ejercicio. Estimación de las Propiedades de Transporte de un Material Compuesto.

- El coeficiente de difusión se calcula como sigue para el solvente (bf) y para el nanofluido (nf) resultado de la combinación del solvente con la nanopartícula:

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{\rho_{nf}\, Cp_{nf}} \qquad \alpha_{bf} = \frac{k_{bf}}{\rho_{bf}\, Cp_{bf}}$$

$$\alpha_{nf} = 171 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s} \qquad \alpha_{bf} = 147 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$$

Ejercicio. Estimación de las Propiedades de Transporte de un Material Compuesto.

- Si relacionamos los coeficientes de difusión del nanofluido y del solvente o fluido base entre sí obtenemos un cociente que relaciona ambas cantidades:

$$\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_{bf}} = \frac{171 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}}{147 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}} = 1.166$$

Referencias

- Introductory Transport Phenomena.

  R. B. Bird, W. E. Stewart, D. N. Lightfoot, D. J. Klingenberg.

  JohnWiley & Sons, 2015.

- La Relación Estructura-Simetría-Propiedades en Cristales Y Policristales.

  L. E. Fuentes Cobas, M. E. Fuentes Montero.

  Reverté Ediciones – SMCr – CIMAV – Universidad Autónoma de Chihuahua, sección 4.4., 2008.

- Heat and Mass Transfer.

  Rajendra Karwa.

  Springer Science+Business Media, 2017.

- Mass Transfer. Principles and Applications.

  Diran Basmadjian.

  CRC Press, Taylor & Francis e-Library, 2005.

- Introduction to Transport Phenomena Modeling. A Multiphysics, General Equation-Based Approach.

  Gianpaolo Ruocco.

  Springer International Publishing AG 2018.

Referencias

- 3D hybrid finite elements for anisotropic heat conduction in a multi-material with multiple orientations of the thermal conductivity tensors.

  Z. Annasabi, F. Erchiqui.

  International Journal of Heat and Mass Transfer 158 (2020) 119795.
- Introducción a la Transferencia de Calor.

  Antonio Valiente Barderas.

  Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, 2009.
- Fundamentals of Heat and Mass Transfer.

  T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, D. P. Dewitt.

  John Wiley and Sons, 2011.
- Chemical Reaction and Reactor Design.

  Hiroo Tominaga, Masakazu Tamaki.

  John Wiley and Sons, 1997.
- Multicomponent Mass Transfer.

  Ross Taylor, R. Krishna.

  John Wiley and Sons, 1993.

Referencias

- Introducción a la Mecánica del Medio Continuo.

  Armando Ortiz Prado, Juan Armando Ortiz Valera, Osvaldo Ruiz Cervantes.

  División De Ingeniería Mecánica E Industrial, Unidad De Investigación Y Asistencia Técnica En Materiales, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2013.

- The Properties of Gases and Liquids.

  B. E. Poling, J. M. Prausnitz, J. P. O'Connell.

  McGraw-Hill, 2001.

- Beyond Equilibrium Thermodynamics

  Hans Christian Ottinger.

  John Wiley & Sons. Inc., 2006.

- Estudio Bibliográfico Diferencial De Los Números Adimensionales Que Intervienen En Procesos De Mecánica De Fluidos Y De Transmisión Del Calor.

  César Francisco Alcaraz Rubio.

  Tesis, Universidad Politécnica de Cartagena, 2007.